

ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проводится исследование эффекта воздействия электромагнитного излучения генератора шума и радиопоглощающих материалов различного типа на электроэнцефалограмму. Анализ электроэнцефалограмм осуществляется методом задержанной координаты.

Определяются качественные (фазовые диаграммы) и количественные (корреляционная размерность, энтропия Колмогорова) параметры электроэнцефалограмм при воздействии электромагнитного излучения.

Анализ электроэнцефалограмм показывает, что в них наблюдаются различные структурные изменения при воздействии сигналов генератора и размещении защитных экранов. Полученные количественные параметры обеспечивают информацией об увеличении активности центральной нервной системы при снижении спектральной плотности мощности бета- и тета-ритмов при действии электромагнитного излучения и радиопоглощающих материалов.

На основании характера вариабельности нелинейных параметров электроэнцефалограмм можно обосновать выбор радиопоглощающего материала для защиты человека от шумовых электромагнитных излучений.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма; шум; генератор; оценка; нелинейная динамика; излучения; радиопоглощающий материал.

The effects exerted by the electromagnetic radiation of noise generators and by the radio absorbing materials of different types on electroencephalograms are studied. The electroencephalograms are analyzed using the delayed coordinate method.

The qualitative (phase portraits) and quantitative (correlation dimension and Kolmogorov entropy) parameters of encephalograms subjected to the electromagnetic radiation are determined. The performed analysis of electroencephalograms shows that their structural changes are different for signals of the operated noise generators and with the use of protection screens between the noise generator and wide-band antenna.

The obtained quantitative parameters provide information about the increasing activity of the central nervous system on lowering of the spectral power densities of beta- and teta-rhythms due to the electromagnetic radiation of noise generators and with the use of radio absorbing materials. Based on variability of the nonlinear electroencephalogram parameters, one can substantiate a choice of radio absorbing materials for protection of humans against electromagnetic radiation.

Key words: electroencephalogram; noise; oscillator; estimation; nonlinear; dynamics; radiation; radio absorbing; material.

Задачи обеспечения защиты информации в корпоративных сетях в настоящее время являются чрезвычайно актуальными. Среди технических методов защиты получают развитие активные и пассивные. Активные методы включают зашумливание побочных излучений путем формирования широкополосных шумовых сигналов с помощью генераторов шума [1]. Пассивные методы защиты направлены на ослабление побочных излучений и наводок и реализуются при использовании экранов из радиопоглощающих материалов [2].

Применение активных методов защиты в корпоративных сетях крупных компаний, оснащенных различными техническими средствами, ограничено требованиями обеспечения электромагнитной совместимости оборудования и экологической безопасности человека. Представляет научный и практический интерес воздействие электромагнитных шумовых излучений при наличии радиопоглощающих материалов на организм человека и, прежде всего, на деятельность его центральной нервной системы.

В научной литературе неоднозначно трактуются данные об эффектах указанного воздействия, в частности излучений мобильной связи [3, 4, 5], на организм человека. Однако обеспокоенность Всемирной организации здравоохранения и населения влиянием излучений мобильной связи на здоровье человека не исчезает [6]. В наших работах [7, 8] показано, что в результате воздействия излучений мобильного телефона и размещения экранов из радиопоглощающих материалов, изготовленных с использованием в качестве основы как целлюлозного и машинно-вязаного полотен, так и полимеров с добавлением нанотрубок, выявлены структурные особенности электроэнцефалограмм и установлены некоторые закономерности.

Целью настоящей статьи является изучение и количественный анализ электроэнцефалограмм человека на основе нелинейного метода при действии электромагнитных шумовых излучений и размещении экранов из радиопоглощающих материалов.

Метод задержанной координаты

В качестве нелинейного метода при исследовании электроэнцефалограмм нами применен метод задержанной координаты. Для визуального анализа использовано построение фазовых диаграмм, которые дают возможность определять степень заполнения фазового пространства динамической системы. При применении метода задержанной координаты определяются корреляционная размерность и энтропия Колмогорова. Корреляционная размерность позволяет установить область локализации динамической системы в фазовом пространстве или число степеней свободы указанной системы. Энтропия Колмогорова характеризует устойчивость работы динамической системы. Согласно алгоритму метода задержанной координаты [9] временная реализация электроэнцефалограммы представляется в виде

$$x_1, x_2, \dots, x_n, \quad (1)$$

где $x_n = x(np)$; p – шаг дискретизации; n – целое число.

Эта последовательность порождает m -мерные векторы, лежащие в m -мерном фазовом пространстве:

$$\vec{x}_i^T = (x_i, \dots, x_{i+m-1}), \quad (2)$$

где T – знак транспонирования.

Состояние системы в реконструированном m -размерном фазовом пространстве определяется m -размерными точками для каждой реализации $x(p)$:

$$x_i^m = \left(m^{-1/2} \right) (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}). \quad (3)$$

Корреляционный интеграл $C_m(l)$ – это функция, равная вероятности того, что расстояние между двумя реконструированными векторами \vec{x}_i меньше l .

Корреляционная размерность d определяется следующим образом:

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} [\lg C_m(r) / \lg r], \quad (4)$$

где $C_m(r)$ – корреляционный интеграл; r – размер ячейки разбиения или коэффициент подобия.

Корреляционный интеграл записывается как

$$C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - |\vec{x}_i - \vec{x}_j|), \quad (5)$$

где $\theta = 0$ при $t \leq 0$; $\theta = 0,5$ при $t = 0$; $\theta = 1$ при $t \geq 0$; θ – функция Хевисайда; N – число точек, используемых для оценки размерности.

Найдено, что для малых r поведение функции $C_m(r)$ может быть описано как

$$C_m(r) = r^d, \quad (6)$$

где d – параметр, близкий к фрактальной размерности странного аттрактора; r – параметр подобия.

Для достоверной оценки корреляционной размерности d размерность соответствующих фазовых пространств должна удовлетворять условию Мане:

$$m \geq 2d + 1. \quad (7)$$

Для снижения объема вычислений используется алгоритм И. Арансона, позволяющий оперировать целыми числами и существенно снизить временные затраты.

Энтропия Колмогорова определяется выражением

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \lg [C_m(r) / C_{m+1}(r)]. \quad (8)$$

Методика исследований

Для проведения исследований выбран метод задержанной координаты, в основу которого положено представление сигнала как детерминированного хаоса [9].

В процессе выполнения работы в информационно-измерительной системе, адаптированной для работы с электроэнцефалограммами [9], проводили обработку и анализ данных 16 здоровых людей. Обработаны электроэнцефалограммы в 16 отведениях, включая: $Fp_1 - A_1$; $Fp_2 - A_2$; $C_3 - A_1$; $C_4 - A_2$; $O_1 - A_1$; $O_2 - A_2$; $T_3 - A_1$; $T_4 - A_2$, зарегистрированных по Международной схеме «10–20», электроэнцефалографом «Нейрокартограф» фирмы МБН. Достоверность установления корреляционной размерности и энтропии Колмогорова определяли методом дискриминационной статистики. В статье приводятся также полученные нами результаты расчета спектральной плотности мощности ритмических компонент исследованных электроэнцефалограмм, которые обрабатывались в шести режимах: фон (режим 1); генератор шума (режим 2); генератор шума, экран 1 (режим 3); генератор шума, экран 2 (режим 4); генератор шума, экран 5 (режим 5); генератор шума, экран 6 (режим 6).

При проведении исследований использовался сверхвысокочастотный генератор шума на транзисторах, описанный в [10].

В качестве экранов из радиопоглощающих материалов использованы: экран 1 (на основе гипсокартона и битума), экран 2 (на основе смешанного с тканью бетона), экран 5 (с металлическими вкраплениями) и экран 6 (на основе шлама очистки ваграночных газов, закрепленного в связующем веществе – цементе) [11]. Коэффициент передачи S_{21} экранов 1 и 2 составлял от -46 до -49 и от -2 до $-3,5$ дБ соответственно, коэффициент отражения S_{11} в среднем находился в пределах от $-0,5$ до -3 и от $-2,0$ до $3,5$ дБ в диапазоне от $0,5$ до 3 ГГц. Коэффициент передачи S_{21} использованных в процессе проведения исследований экранов 5 и 6 составлял -25 дБ (диапазон от $0,7$ до 17 ГГц). Коэффициент отражения S_{11} при этом в среднем имел значение от $0,2$ до 2 дБ для экрана 5 и -10 дБ для экрана 6 в диапазоне частот от $0,7$ до 17 ГГц.

Результаты исследований и их обсуждение

В ходе исследований был проведен анализ электроэнцефалограмм отведений $Fp_1 - A_1$, $Fp_2 - A_2$; $P_3 - A_1$, $P_4 - A_2$; $T_3 - A_1$, $T_4 - A_2$. На основании зарегистрированных в клинических условиях электроэнцефалограмм были построены их фазовые портреты.

Более подробные результаты исследований приведены для электроэнцефалограмм отведения $T_4 - A_2$. Фазовые портреты электроэнцефалограмм отведений $T_4 - A_2$ в шести исследованных режимах работы представлены на рис. 1.

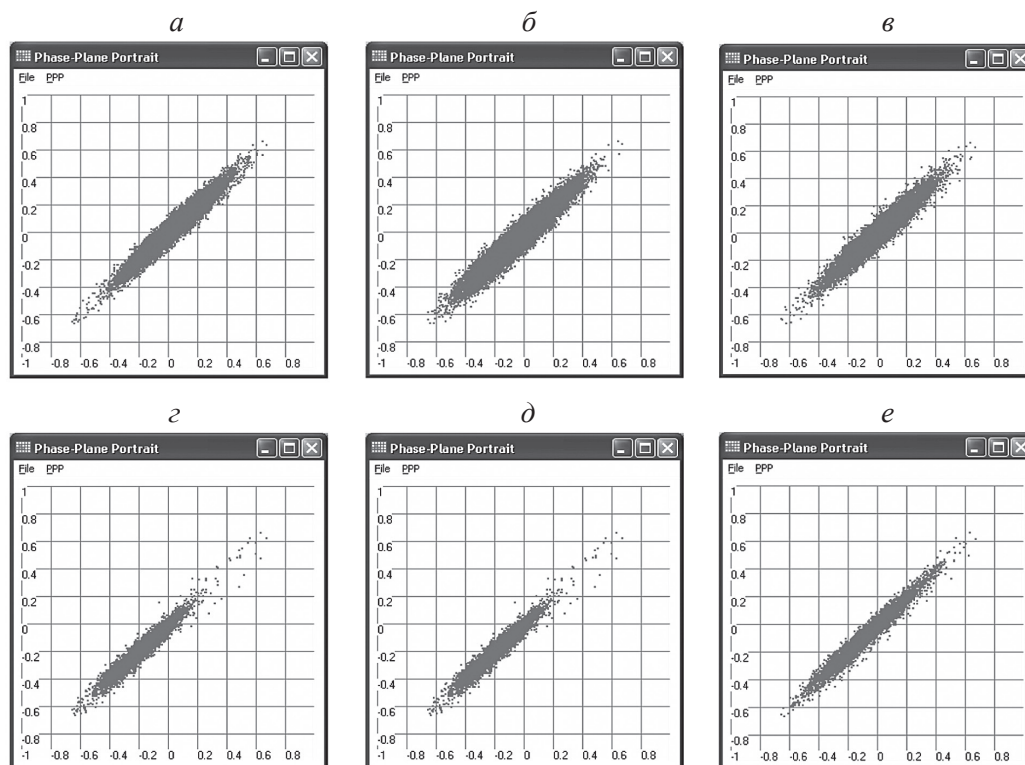


Рис. 1. Фазовые портреты электроэнцефалограмм отведений $T_4 - A_2$ в состояниях: фон (режим 1) (а); генератор шума (режим 2) (б); генератор шума, экран 1 (режим 3) (в); генератор шума, экран 2 (режим 4) (г); генератор шума, экран 5 (режим 5) (д); генератор шума, экран 6 (режим 6) (е)

При анализе фазовых диаграмм отмечается изменение их области локализации в фазовом пространстве в состояниях центральной нервной системы, описываемых в указанных выше шести режимах. Для электроэнцефалограмм в состоянии, характеризуемом фоном (режим 1), наблюдалась размытая структура эллипса; для электроэнцефалограмм в состоянии, определяемом режимом 2 (генератор шума), область локализации фазового портрета имеет четкие очертания с большей площадью эллипса. Каждый из фазовых портретов электроэнцефалограмм, определяемых при действии излучений мобильной связи и различного типа радиопоглощающих экранов, имеет свою форму.

Различия фазовых портретов исследуемых электроэнцефалограмм (отведения $T_4 - A_2$) проявились в количественном изменении параметров динамической системы – корреляционной размерности и энтропии Колмогорова, а также спектральной плотности мощности ритмических компонент мозга. Динамику указанных параметров можно наблюдать по гистограммам, приведенным на рис. 2 и 3.

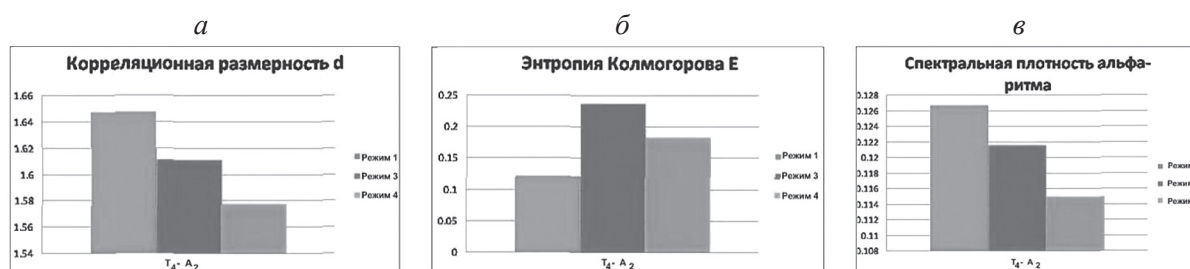


Рис. 2. Гистограммы распределения корреляционной размерности d (а); энтропии Колмогорова E (б); спектральной плотности мощности альфа-ритма (в) электроэнцефалограмм отведений $T_4 - A_2$ у здоровых лиц в режимах работы: фон (режим 1); генератор шума (режим 2); генератор шума, экран 1 (режим 3); генератор шума, экран 2 (режим 4)

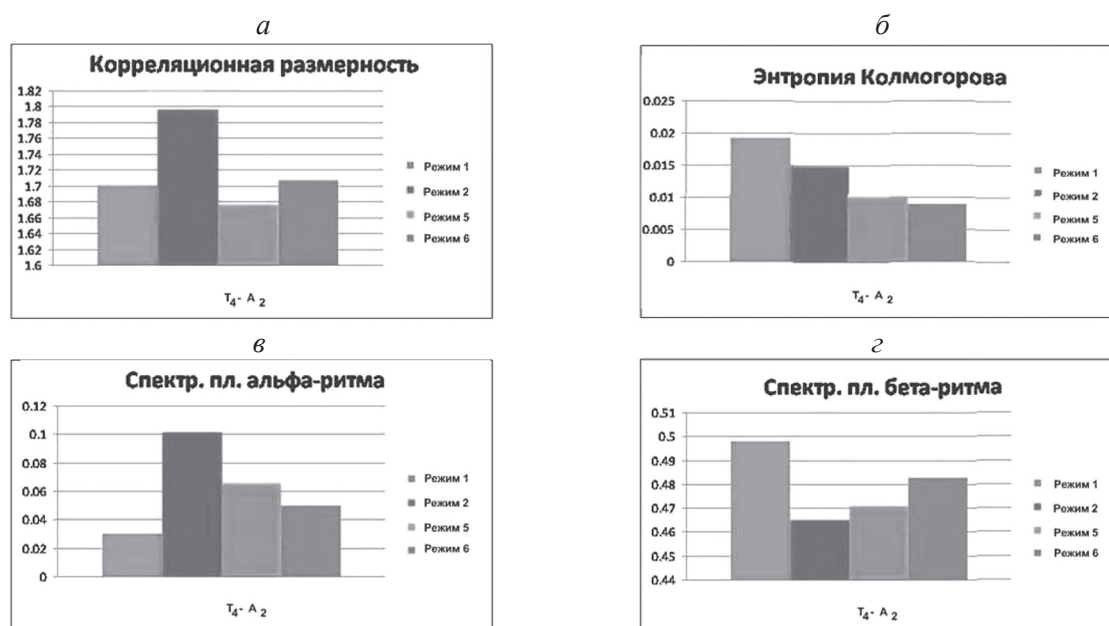


Рис. 3. Гистограммы распределения корреляционной размерности d (а); энтропии Колмогорова E (б); спектральной плотности мощности альфа- (в), бета- (г) ритмов электроэнцефалограмм отведений $T_4 - A_2$ в режимах работы: фон (режим 1); генератор шума (режим 2); генератор шума, экран 5 (режим 5); генератор шума, экран 6 (режим 6)

При действии электромагнитного излучения генератора шума и введении дополнительно экрана 1 (режим 3) и экрана 2 (режим 4) значение корреляционной размерности d электроэнцефалограмм отведения $T_4 - A_2$ снижается на 2,2 и 4,2 % соответственно. Значения же параметра энтропии Колмогорова E практически во всех отведениях возрастают, в частности в отведении $T_4 - A_2$ – на 94,4 и 50,9 %. Спектральная плотность мощности альфа-ритма уменьшается, в режиме 3 это снижение составляет 4,0 %, а в режиме 4 – 9,2 % по отношению к фону. Наблюдается снижение спектральной плотности мощности бета-ритма и возрастание тета-ритма. Отмечается тенденция к торможению процессов функционирования в этой области мозга.

Из анализа гистограмм распределения параметров электроэнцефалограмм, приведенных на рис. 3, видно, что действие электромагнитного излучения генератора шума (режим 2) приводит к увеличению корреляционной размерности d на 5,6 % по отношению к фону. Совместное действие излучения и

дополнительно введенного экрана 5 (режим 5), излучения и экрана 6 (режим 6) снижает значение корреляционной размерности на 1,5 % и увеличивает на 0,4 % соответственно. Что же касается энтропии Колмогорова E , то ее значение снижается по отношению к фону при действии излучения генератора шума, излучения и экрана 5, излучения и экрана 6 на 22,7; 47,7 и 53,5 % соответственно. Спектральная плотность мощности альфа-ритма в электроэнцефалограмме отведения $T_4 - A_2$ возрастает при действии излучений генератора шума в 3,3 раза по отношению к фону. Дополнительное введение экрана 5 (режим 5) или экрана 6 (режим 6) снижает уровень мощности и составляет соответственно 2,1 раза и 1,6 раза по отношению к фону. Спектральная плотность мощности бета-ритмов при этом уменьшается по отношению к фону на 6,6; 5,4 и 3,1 % соответственно. Отмечается увеличение спектральной плотности мощности тета-ритмов.

Сравнительный анализ показателей электроэнцефалограмм, проведенный на примере отведения $T_4 - A_2$, показывает, что значения корреляционной размерности практически восстанавливаются, энтропии Колмогорова снижаются при действии электромагнитных шумовых излучений и экранов 5, 6 по отношению к фону в отличие от воздействий излучения и экранов 1, 2. Это свидетельствует о том, что динамическая система в результате экранирования (режим 6) приобретает то же количество степеней свободы, что и в фоне. Снижение же энтропии подтверждает увеличение стабильности системы. Возрастание спектральной плотности мощности альфа-ритма при снижении бета- и увеличении тета-ритмов может объясняться напряжением в работе отдельных структур мозга.

В результате проведенных исследований установлено, что при действии электромагнитных шумовых излучений ритмические процессы мозга перестраиваются: происходит их активизация при снижении бета- и тета-ритмов. Использование экранов из радиопоглощающих материалов компенсирует в определенной степени влияние электромагнитных излучений, снижая уровень возбуждения и обуславливая торможение процессов головного мозга. При этом наблюдаются изменения вариабельности нелинейных параметров электроэнцефалограмм здоровых людей, на основании характера которых можно обосновать выбор радиопоглощающего материала для защиты человека от электромагнитных шумовых излучений.

Таким образом, при решении технических задач защиты информации с использованием радиопоглощающих материалов необходимо учитывать изменения в деятельности центральной нервной системы для обеспечения экологической безопасности человека.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В. П. Сверхширокополосные генераторы шума и их практическое применение // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 37–45.
2. Борботько Т. В., Лыньков Л. М., Колбун Н. В. Углеродсодержащие минералы и области их применения. Минск, 2009.
3. Luria R., Eliyahu I., Hareuveny R. Cognitive Effects of Radiation Emitted by Cellular Phones: the Influence of Exposure Side and Time // Bioelectromagnetics. 2009. Vol. 3, № 30. С. 198–204.
4. Ruediger H. W. Genotoxic Effects of Radiofrequency Electromagnetic Fields // Pathophysiology (Elsevier). 2009. Vol. 16, № 2/3. Р. 89–98.
5. Григорьев Ю. Г., Сидоренко А. В. Электромагнитные поля нетеплового уровня и оценка возможного развития судорожного синдрома // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50, № 5. С. 1–8.
6. Воздействие мобильной связи на здоровье человека [Электронный ресурс]. 2010. Режим доступа: <http://www.medicin-form.net> (дата обращения: 01.02.2013).
7. Сидоренко А. В., Лыньков Л. М., Овсянкина Г. И., Казека А. А., Леончик Ю. Л. Анализ электроэнцефалограмм на основе динамического хаоса при действии излучений мобильного телефона и защитных экранов // Весці НАН Беларусі. Сер. медыцынскіх навук. 2010. № 4. С. 57–65.
8. Сидоренко А. В., Жалковский М. В., Макарова Ж. А., Солодухо Н. А. Показатели нелинейной динамики электроэнцефалограмм при наличии излучений мобильной связи и радиопоглощающих полиуретановых композиций // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 12. С. 44–51.
9. Сидоренко А. В. Методы информационного анализа биоэлектрических сигналов. Минск, 2003.
10. Жалковский М. В., Сидоренко А. В. Мобильный генератор электромагнитного шума с питанием от порта USB // Электроника инфо. 2013. № 6. С. 35–36.
11. Борботько Т. В., Колбун Н. В., Лыньков Л. М. Антропогенные источники электромагнитного излучения. Безопасность жизнедеятельности человека. Минск, 2008.

Поступила в редакцию 28.03.2014.

Алла Васильевна Сидоренко – доктор технических наук, профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий.